

Санкт-Петербургский государственный университет

Направление 01.03.03 Механика и математическое моделирование
Профиль Механика деформируемого твердого тела

Савкина Анастасия Сергеевна

Усталостные свойства алюминиевого
сплава 6101 электротехнического
назначения, подвергнутого интенсивной
пластической деформации

Дипломная работа

Научный руководитель:
к. ф.-м. н. Ломакин И.В.

Рецензент:
к. т. н. Мурашкин М.Ю.

Санкт-Петербург
2019

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Mechanics and Mathematical Modelling
Deformable Body Mechanics

Savkina Anastasia

Fatigue properties of electrotechnical
aluminum alloy 6101, processed by severe
plastic deformation

Graduation Thesis

Scientific supervisor:
Ph.D. Lomakin I.V.

Reviewer:
Ph.D. Murashkin M.Yu.

Saint-Petersburg
2019

Оглавление

Введение	4
1. Аналитический обзор	6
1.1. Алюминий и его сплавы	6
1.2. Методы термомеханической обработки сплавов группы AlMgSi	9
1.3. Усталостные свойства сплава Al 6101	16
2. Цели и объекты исследования	20
2.1. Цели исследования	20
2.2. Объекты и методики исследования	21
3. Экспериментальные результаты	25
3.1. Влияние режима ИПДК на микроструктура сплава Al 6101	25
3.2. Влияние искусственного старения и интенсивной пласти- ческой деформации на фазовый состав сплава Al 6101 .	26
3.3. Влияние искусственного старения и интенсивной пласти- ческой деформации на электропроводность и микротвер- дость сплава Al 6101	28
3.4. Влияние размеров образца на механические свойства спла- ва Al 6101	29
3.5. Влияние ИПДК на механические и усталостные свойства сплава Al 6101	30
3.6. Фрактография	33
Заключение	35
Список литературы	36

Введение

Алюминий является самым используемым цветным металлом в мире. Это объясняется тем, что алюминий и сплавы на его основе сочетают в себе такие полезные физико-механические свойства, как малая плотность, отличная коррозионная стойкость, высокое значение теплопроводности, пластичность, немагнитность и высокая прочность при добавление некоторых легирующих металлов. Наличие большого запаса алюминия на Земле, легкость и податливость к разным видам формования делают его привлекательным и экономически выгодным в широком спектре применения - от пищевых упаковок и бытовых предметов до машиностроения и транспорта.

Одной из перспективных областей применения алюминия является электротехника, так как алюминий обладает высокой удельной электропроводностью (около 63% от удельной электропроводности меди). В частности, чистый алюминий широко используется в качестве проводникового материала в конструкциях кабелей и проводов. Однако, основным недостатком чистого алюминия является его низкая прочность. Добавление кремния и магния в сочетании с термической обработкой позволяет изготавливать высокопрочные электропроводящие материалы. К числу сплавов этого состава относятся сплавы марок 6101 и 6201. Чаще всего их используют при изготовлении проводов для линий электропередачи и токопроводящих жил других видов кабельной продукции.

В линиях электропередачи одной из основных причин разрушения проводов являются эоловые вибрации. Это колебания с маленькой амплитудой и высокой частотой, созданные под действием ветра. Под таким видом циклической нагрузки кабель повреждается из-за усталостного истирания его проводов в местах контакта с креплениями. Уменьшить влияние эоловых вибраций на выносливость проводов можно с помощью повышения прочностных характеристик материала.

Известно, что традиционные подходы повышения прочности, включающие легирование и различные методы деформационно-термической

обработки, основаны на введении в микроструктуру металла большого количества дефектов кристаллического строения (частиц вторичной фазы, границ зерен, дислокаций). Однако это приводит к снижению электропроводности из-за рассеяния электронов проводимости на тепловых колебаниях решетки, примесных атомах и дефектах. Как следствие, высокая прочность и высокая электропроводность не могут быть одновременно достигнуты традиционными методами обработки металлов. В связи с этим разработка научных подходов повышения прочности алюминия при сохранении высокой электропроводности, является актуальной задачей, решение которой позволит снизить потери при передаче электроэнергии.

Одним из новых методов достижения высокой прочности материала, представляющих интерес для исследователей, является метод интенсивной пластической деформации (ИПД), позволяющий измельчать зерна до ультрамелкого размера и получать микроструктуру с высокой плотностью дефектов. В настоящее время наибольшее развитие получили 2 вида ИПД: равноканальное угловое прессование (РКУП) и интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК).

Основная цель данной работы заключалась в исследовании влияния интенсивной пластической деформации кручением на усталостную прочность и электропроводность сплава Al 6101. Также в ходе работы были получены диаграммы деформирования и кривые усталости для малых и больших образцов крупнозернистого сплава Al 6101. Анализ этих данных позволил сделать вывод о зависимости усталостных и механических свойств от геометрических размеров образца.

Также в рамках этой работы исследовалось влияние времени искусственного старения на микроструктуру и свойства крупнозернистого сплава Al 6101. В результате удалось подобрать режим термической обработки, который позволяет достичь оптимального сочетания высокой прочности и электропроводности сплава.

1. Аналитический обзор

1.1. Алюминий и его сплавы

Уникальные сочетания свойств алюминия и его сплавов делают алюминий одним из самых универсальных, экономичных и популярных металлических материалов.

Алюминий имеет плотность $2,7 \text{ г/см}^3$. Такой легкий вес в сочетании с высокой прочностью некоторых алюминиевых сплавов, превышающих прочность конструкционной стали, позволяет проектировать и конструировать прочные, легкие изделия, которые особенно выгодны для производства некоторых видов транспорта.

Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью. Открытая поверхность алюминия соединяется с кислородом, образуя тонкую инертную пленку оксида алюминия, которая блокирует дальнейшее окисление. Тонкий оксидный слой плотно прилипает к металлу и является бесцветным и прозрачным - невидимым для невооруженного глаза. При надлежащем легировании и обработке алюминий может противостоять коррозии под воздействием воды, соли и других факторов окружающей среды, а также широкого спектра других химических веществ и физических воздействий.

Алюминий демонстрирует отличную электропроводность, которая почти в два раза больше, чем у меди на эквивалентной массе. Высокая теплопроводность материала позволяет применять его для теплообменников, испарителей, электроприборов, а также для автомобильных головок цилиндров и радиаторов.

Алюминий неферромагнитный, это свойство высоко ценится в электротехнической и электронной промышленности. Он не пирофорен, что важно в случаях применения, связанных с обработкой или воздействием горючих или взрывоопасных материалов. Алюминий также не токсичен и обычно используется в контейнерах для продуктов питания и напитков.

Простота изготовления алюминия в любой форме является одним

из его самых важных преимуществ. Его можно скатать до любой желаемой толщины, чтобы фольга была тоньше, чем бумага. Алюминиевый лист может быть штампованным, вытянутым, закрученным или сформированным в рулон. Практически нет ограничений на различные профили (формы), в которых металл может быть экструдирован.

В качестве конструкционного материала обычно используют не чистый алюминий, а разные сплавы на его основе. Существуют системы идентификации этих сплавов. В России основной стандарт— ГОСТ 4784 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки».

Алюминиевые сплавы удобно разделить на две основные категории: деформируемые и литейные. Деформируемые алюминиевые сплавы применяют для получения листов, лент, фасонных профилей, проволоки и различных деталей штамповкой, прессованием, ковкой. Литейные сплавы предназначены для изготовления фасонных отливок.

Международная система обозначения алюминиевых сплавов является наиболее широко принятой системой наименования деформируемых сплавов. Каждому сплаву присваивается четырехзначное число, где первая цифра обозначает основные легирующие элементы, вторая - если отличается от 0 - указывает на изменение сплава, а третья и четвертая цифры обозначают конкретный сплав в серии. Эта классификация выглядит следующим образом [1]:

1xxx: контролируемый нелегированный (чистый) состав, используемый главным образом в электротехнической и химической промышленности.

2xxx: сплавы, в которых медь является основным легирующим веществом. Сплавы этой серии широко используются в авиации, где ценится их высокая прочность (предел текучести до 455 МПа).

3xxx: сплавы, в которых марганец является основным легирующим элементом, используемые в качестве сплавов общего назначения для архитектурных применений и различных изделий.

4xxx: сплавы, в которых кремний является основным легирующим элементом, используемые в сварочных прутках и паяльном листе.

5xxx: сплавы, в которых магний является основным легирующим

элементом. Обладают превосходной коррозионной стойкостью, поэтому используются в корпусах лодок и других изделиях, подверженных воздействию морской среды.

6xxx: сплавы, в которых магний и кремний являются основными легирующими элементами, характеризуются хорошей формуемостью и обрабатываемостью. Обычно используются для экструзии архитектурных конструкций и автомобилей, широко применяются для изготовления проводников и кабелей.

7xxx: сплавы, в которых цинк является основным легирующим элементом (хотя могут быть указаны и другие элементы, такие как медь, магний, хром и цирконий), используемые в элементах конструкций самолетов и других высокопрочных применениях. Серия 7xxx - это самые прочные алюминиевые сплавы с пределом текучести ≥ 500 МПа.

8xxx: сплавы, характеризующие разные составы. Сплавы этой серии могут содержать значительные количества олова, лития и(или) железа.

Сплавы группы AlMgSi дисперсионно упрочняемые сплавы. При термической обработки сплавов образуется вторичная фаза силицид магния Mg_2Si , позволяющая упрочнить сплав. Эти сплавы принадлежат серии 6xxx. Все они характеризуются хорошей формуемостью, свариваемостью, обрабатываемостью и коррозионной стойкостью при прочности в диапазоне $100 \div 300$ МПа. Область применения сплавов этой серии очень широка.

Al 6061 хороший сплав общего назначения, используемый для изготовления широкого спектра конструкций и сварных изделий, включая железнодорожные вагоны, самолеты, химическое оборудование, кухонные приборы и т.д. . В нефтяной промышленности используются сплавы 6070 и 6351. В аэрокосмической - 6066 и 6013. В автопромышленности - 6009, 6010, 6151. Для обшивки используют сплавы 6253 и 6003. Для архитектурного и коммерческого использования подходят сплавы, обладающие хорошей экструзируемостью - 6063, 6463, 6005. Стандартные электрические провода изготавливаются из сплавов алюминия марок 6101 и 6201, подвергнутые соответствующей термообработке.

1.2. Методы термомеханической обработки сплавов группы AlMgSi

Сплавы системы AlMgSi характеризуются электрическими и механическими свойствами в широком диапазоне термической обработки. Типичная схема термообработки представлена на рисунке 1. Для достижения нужных свойств используется оптимальная комбинация деформационного упрочнения и упрочняющего эффекта дисперсионной фазы Mg_2Si .

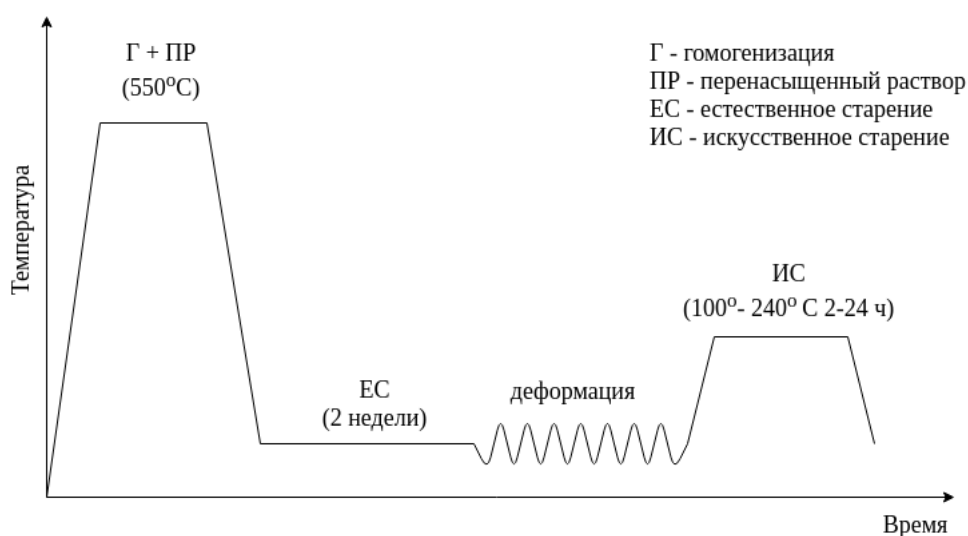


Рисунок 1: Типичная схема термообработки сплавов системы AlMgSi [2]

Процесс термической обработки, в сочетании с выбором оптимального химического состава для достижения наивысшей электропроводности материала, является одним из популярных способов модификации сплавов системы AlMgSi, которые направлены на уменьшение потери электроэнергии в линиях электропередачи. Известно, что потери при передаче электроэнергии описываются квадратичной зависимостью от сопротивления проволоки. Сопротивление же зависит от геометрических параметров проволоки и удельного сопротивления самого материала.

В сплавах 6101 и 6201 содержание Mg и Si может составлять от 0,3 % до максимума 0,9 %. Анализ влияния процентного содержания Mg

и Si на развитие электрических и механических свойств проволок из сплава AlMgSi [2] показал, что более высокое содержание Mg и Si гарантирует получение более высоких уровней прочности образцов при одинаковом уровне удельного сопротивления. На основании результатов эксперимента было установлено, что в процессе искусственного старения в проводах при температуре 100 - 240 °C в течение 2 - 24 часов не получается добиться проволоки с высокой прочностью при растяжении и очень высокой электропроводностью (рисунок 2) .

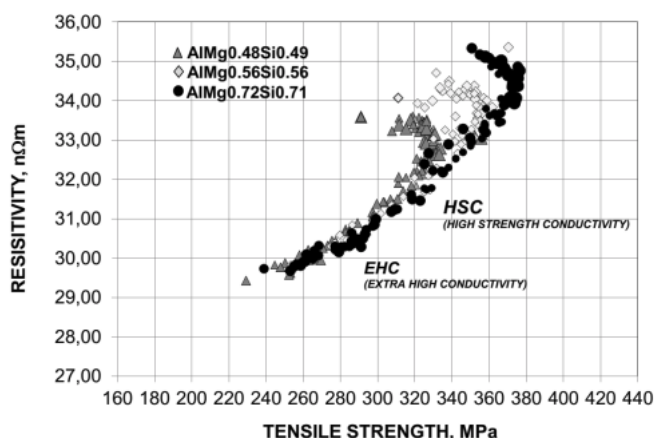


Рисунок 2: Прочность при растяжении и удельное сопротивление проволоки AlMgSi для различных концентраций Mg и Si. (HSC - область с высокой прочностью и электропроводностью, EHC - область очень высокой электропроводности)[2]

В работе [3] исследовалось влияние температуры и времени старения на провода из сплава Al 6201. Проволочные стержни после гомогенизации при 550 °C в течение 10 часов подвергались искусственному старению при определенных температурах и временных интервалах. После этого они были вытянуты в проволоки диаметром 3,0 мм.

Для исследования влияния разных режимов термообработки на прочность образцов были проведены испытания на растяжения (рисунок 3). Искусственное старение позволило увеличить предел прочности более чем в 2 раза по сравнению с отожженным образцом, но при этом материал стал значительно менее пластичным. Естественное старение не позволяет достичь таких же значений прочности образца как после искусственного старения, но пластичность материала сохраняется.

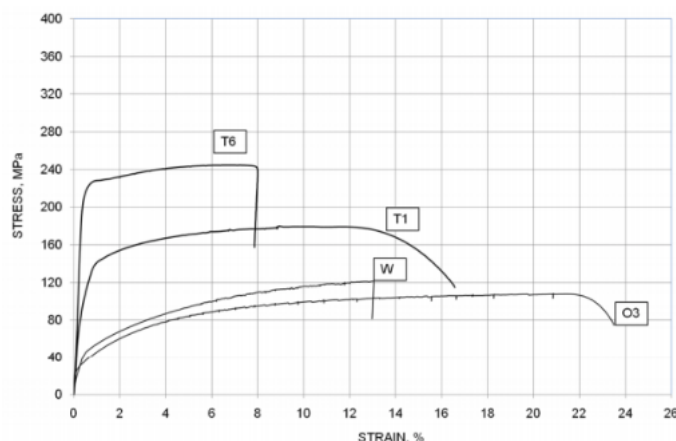


Рисунок 3: Зависимость σ (ϵ) для катанок AlMg0.5Si0.5, подвергнутые термическим обработкам: T6 - искусственное старение, T1 - естественное старение, O3 - гомогенизация, W - отжиг с последующей закалкой [3]

Увеличение значения предела прочности для катанки гарантируется при температурах в диапазоне от 140 °C до 190 °C, более высокий диапазон температур приводит к снижению прочности на растяжение. В результате искусственного старения катанки AlMgSi максимальный рост прочности на растяжение составляет приблизительно 280 МПа, после процесса волочения катанки он увеличился до около 350 МПа. Более подробно это явление изучалось в работе [4].

В ходе исследования были получены данные о зависимости механических свойств чистого алюминия от степени экструзионной деформации. Результаты показали, что механизм упрочнения алюминиевых проводов (АП) под действием холодного волочения можно разделить на три этапа. (рисунок 4). Первый этап характеризуется повышением прочности образцов, связанное с увеличением плотности дислокаций в процессе экструзионной деформации. Механизм упрочнения основан на том, что дислокации могут взаимодействовать друг с другом и препятствовать движению самих себя. Следующий этап - это устойчивая зона, в которой увеличение степени деформации не приводит к значительному росту прочности. Третий этап это вторая стадия упрочнения сплава, вызванная не только высокой плотностью дислокаций, но и изменением формой границ и текстуры зерен.

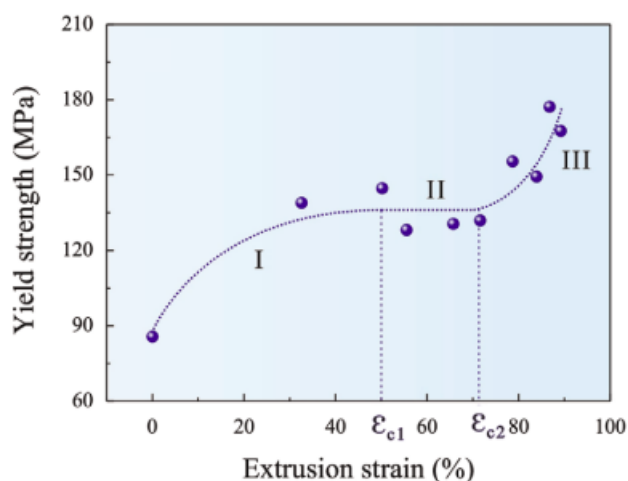


Рисунок 4: Зависимость предела текучести (YS) проводов из чистого алюминия от степени экструзионной деформации [4]

В процессе волочения изменяются границы зерен. Увеличение плотности дислокаций на первом этапе приводит к образованию дислокационной стенки и, как следствие, она может эволюционировать в малоугловые границы зерен (МУГЗ). При последующей пластической деформации МУГЗ постепенно преобразуются в большеугловые границы зерен (БУГЗ). Таким образом, увеличение процентного содержания большеугловых границ зерен приводит ко второму этапу упрочнения.

Причиной упрочнения материала в процессе обработки может быть изменение его текстуры. Изначально преобладающей ориентацией в материале является ориентация (101), с началом экструзии этот тип ориентации эволюционирует в (001) и (111). При дальнейшем увеличении проходов волочения доминирующей ориентацией становится (111).

После первого этапа упрочнения появляется устойчивая зона, в которой предел текучести не изменяется. Это явление объясняется тем, что хоть ориентация зерен изменяется с (101) на (001), фактор Шмидта, влияющий на значение предела текучести материала, для обеих ориентаций одинаковый. [5]

На основе вышесказанного, можно сделать вывод что провода из сплавов Al 6101 и Al 6201 после стандартного технологического процесса, состоящего из гомогенизации, закалки в воду и холодного волочения с последующим искусственным старением, демонстрируют предел

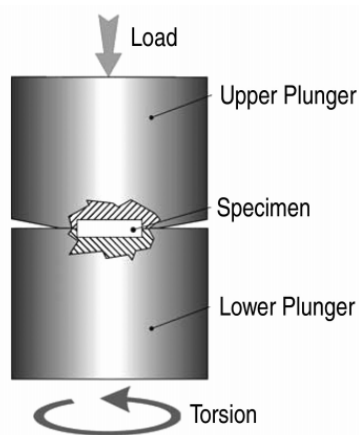
прочности при растяжении в диапазоне 255–330 МПа и электропроводность от 92 до 86 % от проводимости чистого алюминия. Этот термомеханический процесс приводит к снижению концентрации легирующих элементов в твердом растворе за счет формирования вторичных фаз Mg^2Si путем последовательного преобразования зон Гинье-Престона в метастабильные фазы. Достаточно высокие показатели электропроводности объясняются уменьшением концентрации растворимых атомов Mg и Si в матрице Al, которые оказывают наибольшее влияние на рассеивание проводящих электронов.

Дальнейшее упрочнение материала и повышение электропроводности традиционным способом обработки невозможно, так как по правилу Матиссена каждый механизм упрочнения добавляет дополнительное электрическое удельное сопротивление. В связи с этим следует рассмотреть новые методы модификации структуры сплава, например, интенсивную пластическую деформацию (ИПД). Этот способ механической обработки, сопровождается крайне высокими степенями деформаций и обычно сложным напряженным состоянием или высокими сдвиговыми напряжениями. Результатом ИПД являются образцы без значительных изменений в размерах с разориентированной мелкозернистой структурой. Уменьшение размера зерна по соотношению Холла-Петча влечет за собой рост предела текучести материала и снижение его пластичности.

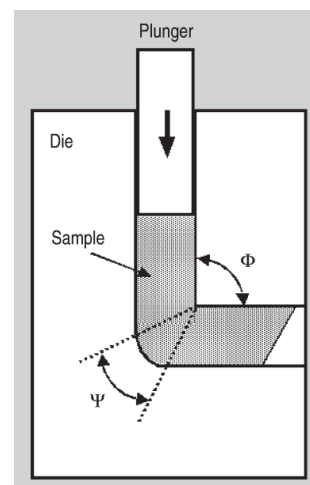
Среди современных техник ИПД, равноканальное угловое прессование (РКУП) и интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) – наиболее развивающиеся и многообещающие методы измельчения зерна .

ИПДК осуществляется путём одновременного сжатия тонкого образца (specimen) между двумя бойками (plungers) и кручения, благодаря повороту одного из них на определенный угол при приложенном давлении P , как показано на рисунке 5 (а).

Метод РКУП заключается в продавливании (экструзии) материала (sample) через наклонные каналы с одинаковой площадью поперечного сечения с помощью пуансона (plunger), в соответствии с рисунком 5 (б).



(a)



(б)

Рисунок 5: Схема действия методов: (а) ИПДК, (б) РКУП [6]

Выбор оптимального режима ИПДК и последующей термической обработки приводит к одновременному повышению прочности и электропроводности сплавов [7]. Диски диаметром 20 мм были вырезаны из стержней сплавов 6101 и 6201. Гомогенность добивалась с помощью отжига в течение 1 ч при 550 °С и последующей закалкой в воду. Процесс ИПДК проводился при приложенном давлении $P = 6$ ГПа и скорости вращений бойка $v = 1$ об/мин. Образцы были деформированы до 20 оборотов при различных температурах ниже 180 °С.

Результаты показали, что повышение температуры, при которой происходит ИПДК, ведет к увеличению электропроводности и снижению микротвердости образцов (рисунок 6). Видно, что одно из лучших сочетаний прочности и проводимости было достигнуто при температуре 130 °С - электропроводность $31,41 \pm 0,12$ МСм / м, такая же как и при обычном искусственном старении (Т6), но с прочностью на 20% выше.

Степень деформации, применяемая к материалу, также оказывает существенное влияние на свойства (рисунок 7). В трех тестируемых условиях один оборот НРТ вызывает резкий скачок микротвердости (от ~ 50 HV до $110 \div 140$ HV), тогда как более высокий уровень деформации не обеспечивает какого-либо значительного увеличения этого параметра, за исключением комнатной температуры. Эволюция проводимости в зависимости от уровня деформации демонстрирует, однако, более

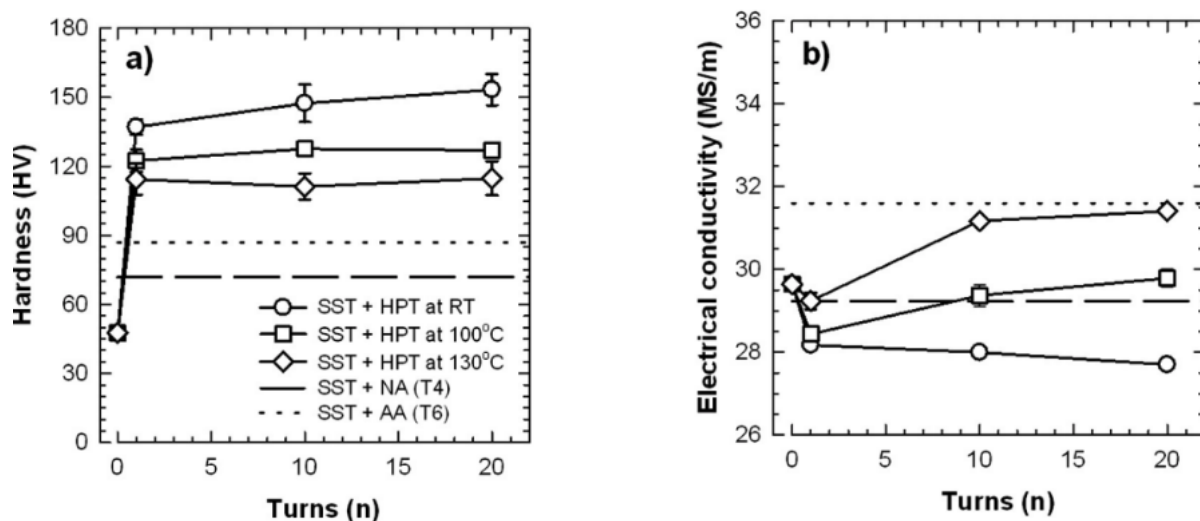


Рисунок 6: Зависимость электропроводности и твердости сплава Al 6101, подвергнутого разным термическим обработкам, от количества оборотов ИПДК. (RT - комнатная температура, SST - насыщенный твердый раствор, T4 - естественное старение, T6 - искусственное старение) [7]

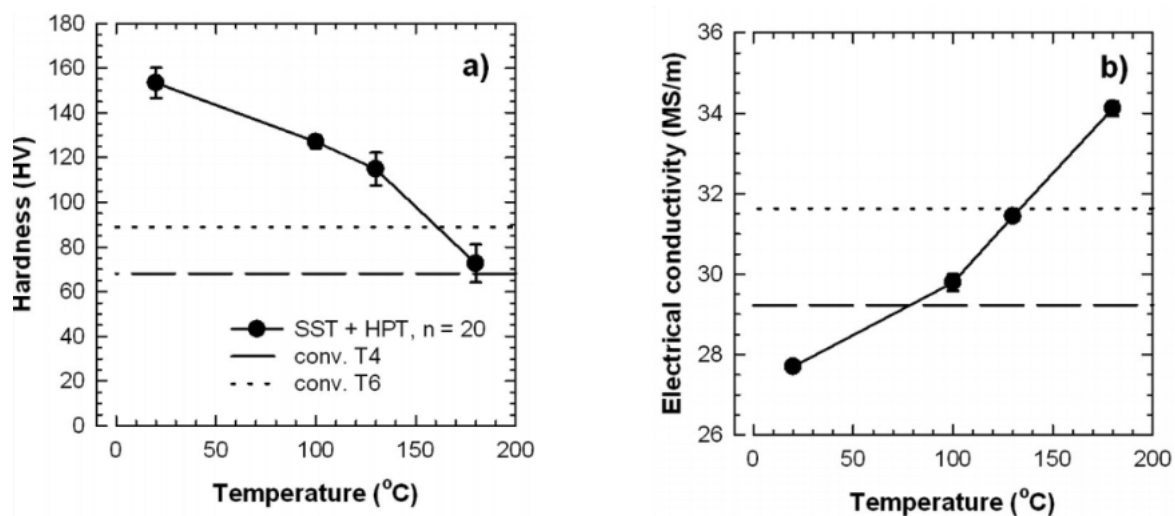


Рисунок 7: Диаграммы электропроводности и твердости сплава Al 6101, подвергнутого ИПДК при разных температурах. (T4 - естественное старение) [7]

сложное поведение. Во-первых, в любом случае, независимо от уровня деформации, самая высокая температура ИПДК дает самую высокую электрическую проводимость. Низкий уровень деформации вызывает небольшое уменьшение электропроводности, последующее увеличение

числа оборотов приводит к росту её значений.

Таким образом, можно сделать вывод, что ультрамелкозернистые сплавы с наноразмерными дисперсионными частицами являются эффективным решением для получения оптимальной комбинации значений прочности и электропроводности в сплавах Al.

1.3. Усталостные свойства сплава Al 6101

В линиях электропередач одной из основных причин повреждения электрических проводов являются эоловые вибрации. Они возникают в результате воздействия на провод ламинарного потока ветра. Движение воздушных масс в направлении перпендикулярном к проводнику приводит к возникновению завихрений воздуха за проводом, которые вызывают вибрации с высокой частотой и малой амплитудой (меньше диаметра провода). Эоловые вибрации создают изгибающие напряжения в алюминиевых проводах, которые приводят к фреттинговому износу.

Для изучения этого явления авторы работы [8] создали установку для усталостных испытаний электрических проводников в подвесных зажимах. Модификация этой установки использовалась для оценки усталостных разрушений алюминиевых проводов ЛЭП [9]. На рисунке 8 показан схематический вид этой установки. Проводник закреплен в неподвижном блоке (fixed block 1) и в подвесном зажиме (suspension clamp), расположенном над подвижным бетонным блоком (adjustable clamp). Эоловая вибрация проводника моделируется с помощью электромеханического шейкера (shaker), который подключен к проводнику в пределах активной зоны (active span). Для натяжения проводника используется рычаг (lever arm) на правом краю активного пролета. Этот рычаг соединен с проводником и нагружен для приложения тягового усилия в проводнике. Подвесной зажим был установлен под углом 10° , чтобы имитировать угол провисания между зажимом и проводником в полевых условиях. Тензодатчик (load cell) используется для измерения напряжения во время эксперимента, и два акселерометра используются

для контроля напряжений, один на основании шейкера и другой на регулируемой стороне блока в активной зоне, в 89 мм от последней точки контакта между проводом и зажимом .

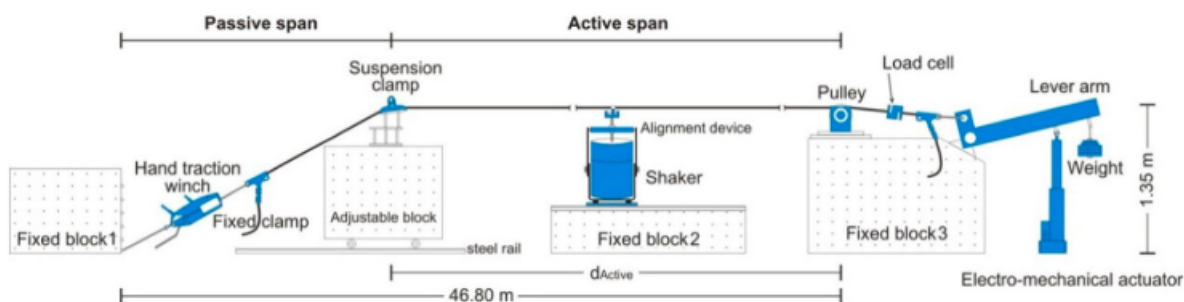


Рисунок 8: Схема установки для усталостных испытаний проводов ЛЭП [9]

В настоящее время передача электроэнергии осуществляется преимущественно по сталеалюминевым проводам, которые состоят из стального сердечника (steel core) и алюминиевой оболочки (aluminium layer). Такие провода получили маркировку ACSR (Aluminium Conductors Steel Reinforced). Конструкция провода марки ACSR приведена на рисунке 9. Стальной сердечник обеспечивает необходимую механическую прочность проводов, а оболочка из технически чистого алюминия является основным проводником электроэнергии.

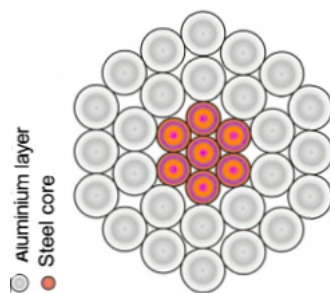


Рисунок 9: Схема ACSR провода [10]

Обычно усталостное разрушение происходит вблизи жестких фиксаторов, которые ограничивают движение проводника, вызывая высокие изгибающие напряжения. В случае проводов ЛЭП образование трещин начинается в областях контакта между проводами или в контактной

поверхности провода и зажима. Анализ поверхности разрушения проводов показал, что образование и распространение трещин происходит под действием усталостного истирания.

Увеличение среднего растягивающего напряжения, приложенного к кабелю, с 20% до 30% предела прочности на разрыв, приводит к среднему снижению выносливости проводников на 50% [10]. Влияние среднего напряжения особенно значительно при низких амплитудах напряжений, характерных для эоловых вибраций. Использование дополнительных жестких распорных зажимов в ЛЭП значительно снижает их долговечность, так как это приводит к увеличению среднего по всему пролету изгибающего напряжения и к снижению действия демпферов Стокбриджа [9]. Геометрия зажима тоже существенно влияет на усталостную прочность материала и на расположение разрывов в проводах [8].

Усталостная прочность может быть повышена с помощью методов интенсивной пластической деформации. В работе [11] исследовалось влияние РКУП на сплав Al 6101. Испытания показали, что прочностные характеристики сплава 6061 Al значительно возросли после обработки, в то время как его пластичность снизилась. Выносливость сплава 6101, подвергнутого одному проходу РКУП, значительно повысилась по сравнению с искусственно состаренным, улучшение было получено как для малоциклового усталости, так и для высокоциклового усталости (рисунок 10 (а)). Однако, когда сплав подвергался дальнейшему прессованию (4 прохода), это преимущество уменьшалось, особенно в режиме высокоциклового усталости. Это объясняется разницей в углах разориентации по границам зерен: материал с 4 проходами РКУП имеет более большие углы разориентации, чем материал с 1 проходом. Дислокациям трудно проходить через границы зерен под большим углом, поэтому межзерновое растрескивание с большей вероятностью происходит на границах зерен с большим углом разориентации, чем на границах зерен с малоугловой разориентацией, где дислокации может переместиться в соседнее зерно с помощью полос сдвига. На малоцикловых испытаниях влияние этого факта незначительно, но в случае многоциклового ис-

пытаний результаты фрактографии показывают, что в материале с 4 проходами присутствуют множественные микротрещины, а в материале с 1 проходом они отсутствуют. Это наблюдение указывает на то, что микротрещины образуются и распространяются легче в материале с 4 проходами, чем с 1 проходом и, следовательно, устойчивость к зарождению трещин, возможно, понижается с увеличением проходов РКУП.

Материал подвергнутый 4 проходам РКУП прочнее, чем материал подвергнутый 1 проходу РКУП, однако ИПД значительно увеличила прочность исходного сплава в 2,5 раза (рисунок 10 (б)). Основываясь на этих результатах, можно сказать, что оптимального сочетания высокой прочности и выносливости получается добиться с помощью одного прохода РКУП.

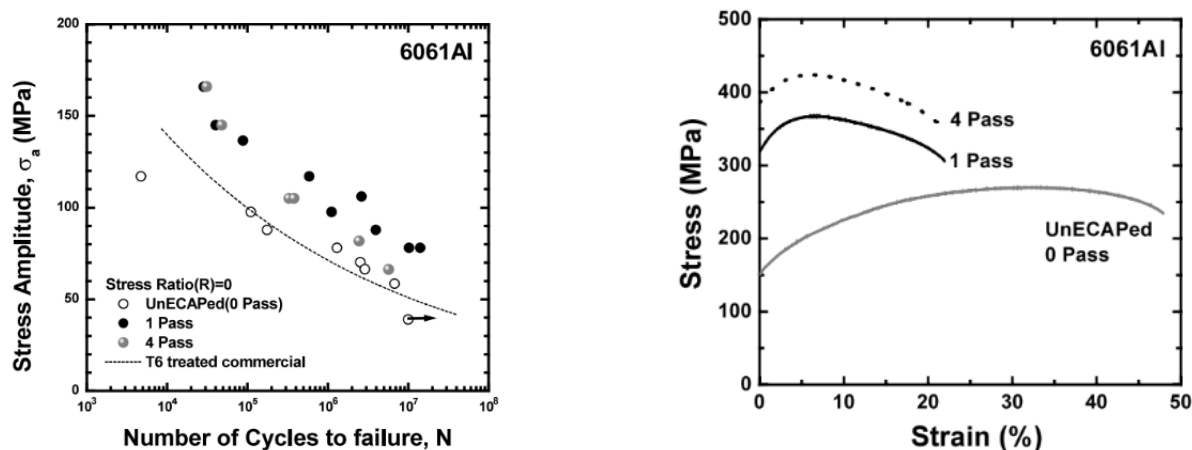


Рисунок 10: а) Кривые Велера для образцов сплава Al 6061, подвергнутого РКУП с разным количеством проходов (pass) и искусственно состаренного, (б) Зависимость $\sigma(\varepsilon)$ для образцов сплава Al 6061, подвергнутого РКУП с разным количеством проходов (pass) [11]

Исследование причин разрушения проводов ЛЭП показывает, что разработка новых методов повышения усталостных свойств алюминиевых сплавов электротехнического назначения является приоритетной задачей. Работы, проводившиеся ранее по этой теме, показывают, что метод интенсивной пластической деформации является многообещающим способом решения этой задачи.

2. Цели и объекты исследования

2.1. Цели исследования

Из анализа литературных данных можно сделать вывод о том, что на данный момент физико-механические свойства алюминиевых сплавов системы AlMgSi активно изучаются. Применение этих сплавов в электротехнической сфере требует повышения прочности и сохранения высокого уровня электропроводности. Применение традиционных способов термомеханической обработки для этого неэффективно, поэтому необходимо рассмотреть новые методы воздействия на материал с целью направленного изменения свойств. Одним из таких эффективных методов может быть интенсивная пластическая деформация. Всесторонний анализ влияния этого метода воздействия на алюминиевые сплавы позволит определить эффективность использования его в технологическом процессе. Положительные результаты влияния ИПДК на прочность сплавов Al 6101 и Al 6201 дают основу для дальнейшего изучения этой методики. Исследование разрушения алюминиевых проводов ЛЭП привлекло внимание к задаче повышения усталостных свойств алюминиевых сплавов электротехнического назначения.

Таким образом, целью данного исследования являлось изучить влияние ИПДК на усталостные свойства алюминиевого сплава 6101.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Определение влияния ИПДК на структуру, электропроводность и механические свойства сплава Al 6101.
2. Определение влияния ИПДК на усталостные свойства сплава Al 6101.
3. Определение подходящего режима термической обработки для получения оптимального сочетания электропроводности и механических свойств сплава Al 6101.

2.2. Объекты и методики исследования

В качестве объекта исследования был выбран алюминиевый сплав АД31Е, зарубежный аналом является сплав Al 6101. Химический состав материала в процентном соотношении: Al - $97.68 \div 99.35$, Si - $0.3 \div 0.7$, Mg - $0.35 \div 0.8$, Fe - до 0.5, Mn - до 0.03, Cu - до 0.1, Zn и В - до 0.1 и до 0.06, соответственно.

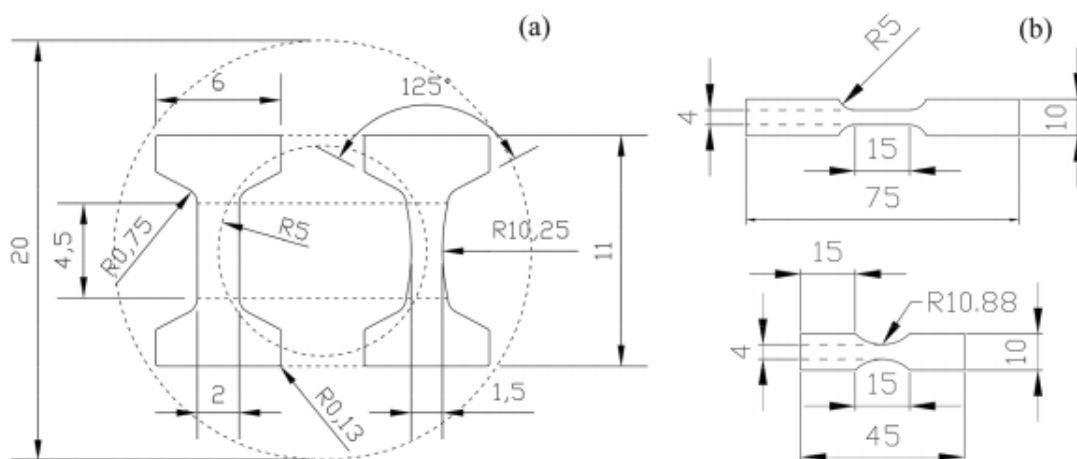
Образцы в форме диска (диаметр 20 мм, толщина 1,4 мм) были предоставлены институтом физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). Там же часть из них была подвергнута обработке ИПДК при комнатной температуре со следующими параметрами: давление - $P = 2$ ГПа, скорость вращения - $v = 1$ об/мин, количество оборотов - 5.

Вторая половина образцов для получения однородной структуры была подвергнута гомогенизационному отжигу при температуре 550°C в течение 2 часов с последующей закалкой в воду. Для определения влияния времени искусственного старения на свойства сплава образцы старились в сушильном шкафу SNOL-50/350 в диапазоне от 1 до 24 часов. Анализ результатов, позволил выбрать режим термообработки крупнозернистых образцов, которые будут использоваться для усталостных испытаний - 160°C в течение 24 часов.

Для изучения микроструктуры и измерения микротвердости поверхность дисков, полученных после ИПДК и термообработки, обрабатывалась на шлифовально-полировальном станке Buehler EcoMet 250 Pro в соответствии с рекомендацией производителя оборудования: последовательно наждачной бумагой Р600, алмазной суспензией с размером частиц 9 мкм и финишная полировка происходила с помощью абразива из карбида кремния с размером частиц 50 нм.

Поскольку на усталостные свойства материала крайне большое влияние оказывает состояние поверхности, то была проведена шлифовка и полировка всей рабочей поверхности образцов для усталостных испытаний. Механическая шлифовка проводилась на шлифовальной бумаге с постепенным уменьшением зернистости и последующей полировкой

Для проведения механических испытаний на усталость и одноосное растяжение на электроэрозионном станке АРТА 123 ПРО из дисков, подвергнутых ИПДК и термообработке, были вырезаны образцы маленького размера (рисунок 11). Для изучения влияния геометрии образцов на механические свойства сплава из прута сплава 6101 с квадратным сечением 1 см, подвергнутого такой же термообработке, как и маленькие образцы, были вырезаны большие образцы (рисунок 11).



Микротвердость измерялась методом Виккерса с приложением нагрузки 0,5 Н в течение 15 секунд. Значение микротвердости для каждого образца определялось как среднее значение 10-ти измерений.

Усталостные свойства образцов были исследованы с помощью сервогидравлической усталостной машины Instron Electropulse E3000. Испытания проходили при частоте 50 Гц и коэффициенте асимметрии цикла $R = 0$.

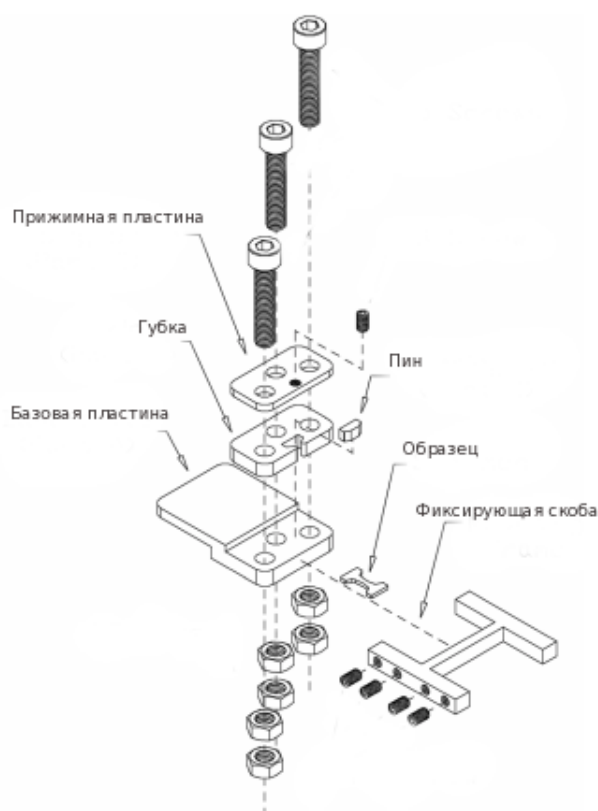


Рисунок 12: Схематичное изображение оригинальных захватов, использованных для усталостных испытаний [12]

мм в диаметре (в соответствии со спецификациями процедуры измерения вихревых токов). Для каждого образца база испытаний составляла не менее 10 измерений.

Испытания на усталость маленьких образцов были проведены с использованием захватов, изображенных на рисунке 12. Для каждого уровня нагрузки было испытано по 3 образца.

Удельное сопротивление образцов измерялось при комнатной температуре, используя вихрековый измеритель марки ВЭ—27 НЦ/4—5 с относительной погрешностью $\pm 2\%$. Так как процесс ИПДК приводит к градиенту деформации сдвига вдоль радиуса образцов в форме диска, для получения среднего значения измерения проводились на расстоянии 0,5 мм от центра диска (рисунок 13). Площадь контакта составляла около 1 мм в диаметре, так что зондируемая зона была около 10

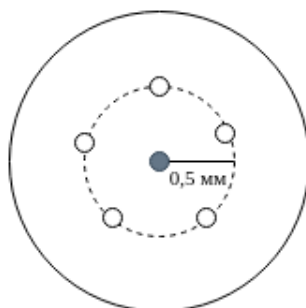


Рисунок 13: Схема измерения электропроводности образцов

Все описанные выше эксперименты были проведены в лаборатории

механики перспективных массивных наноматериалов для инновационных инженерных приложений при Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) была проведена в УГАТУ. Информация о размере зерен была получена с помощью микроскопа для ПЭМ JEOL - 2000 EX при ускоряющем напряжении 160 кВ. Сканирующая электронная микроскопия была проведена в междисциплинарном ресурсном центре по направлению "Нанотехнологии" СПбГУ. Поверхности усталостного разрушения исследовались с помощью Zeiss AURIGA Laser при ускоряющем напряжении 5 кВ. Рентгенодифракционное исследование было проведено в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» СПбГУ с использованием рентгеновского дифрактометра высокой четкости Bruker D8 DISCOVERY. Угол Брэгга 2θ варьировался от 30° до 125° .

3. Экспериментальные результаты

3.1. Влияние режима ИПДК на микроструктура сплава Al 6101

Исследования микроструктуры методом ПЭМ показали, что в результате обработки ИПДК при комнатной температуре с режимом $P = 2$ ГПа, 5 оборотов исходная крупнозернистая (КЗ) структура (рисунки 14 (а), (б)) сплава трансформируется в однородную ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру (рисунки 14 (в),(г)). Размер зерна уменьшается до среднего значения $350 \pm 117,2$ нм. Гистограмма распределения размеров зерен представлена на рисунке 15.

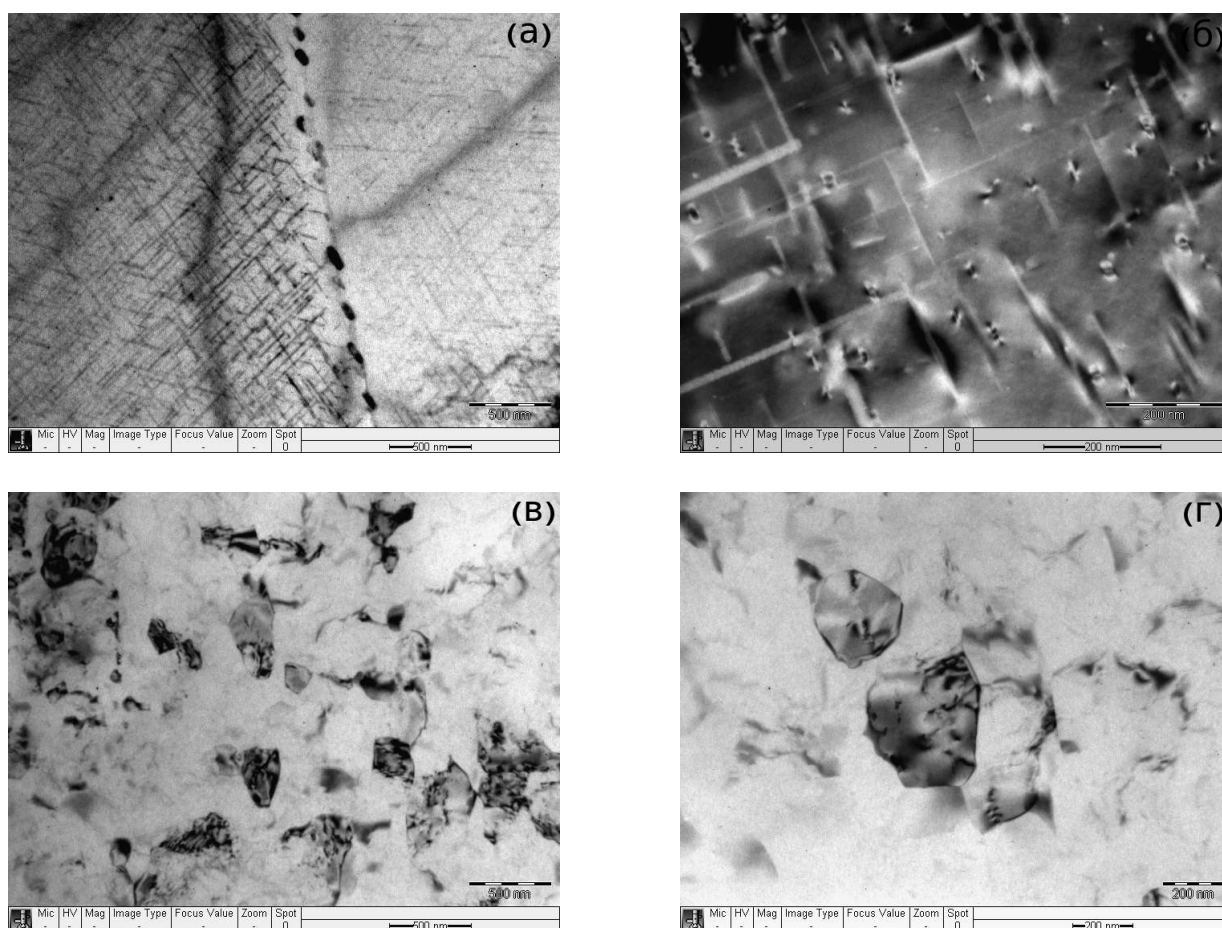


Рисунок 14: Светлопольные ПЭМ изображения микроструктуры сплава Al 6101: (а),(б) КЗ образец; (в),(г) УМЗ образец

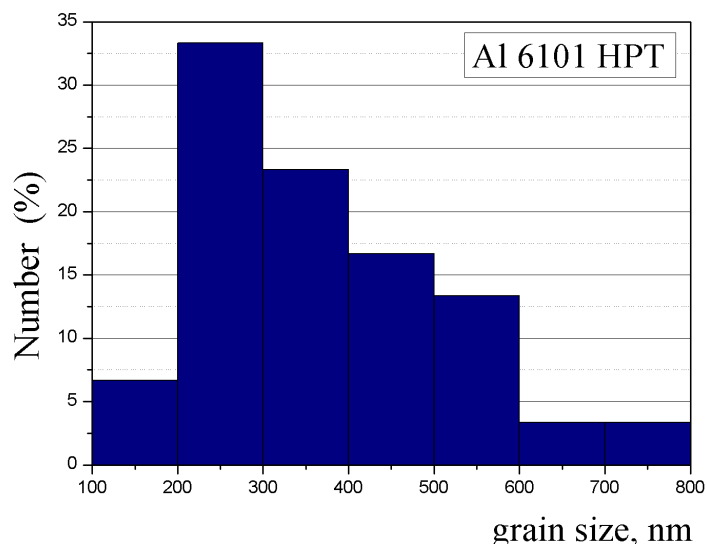


Рисунок 15: Гистограмма распределения размеров зерен в сплаве Al 6101 после ИПДК

3.2. Влияние искусственного старения и интенсивной пластической деформации на фазовый состав сплава Al 6101

На рисунке 16 представлены рентгенограммы образцов сплава после гомогенизации, искусственного старения и ИПДК. В результате ИПДК наряду с формированием УМЗ структуры происходит изменение фазового состава сплава, о чем свидетельствует отсутствие на рентгенограмме образца, подвергнутого ИПДК, пиков от вторичных фаз. Видно, что после ИПД пики алюминия становятся шире и менее интенсивными, это связано с искажением кристаллической решетки из-за введения большого количества внутренних напряжений в процессе ИПДК.

Помимо дифракционных пиков алюминия, на рентгенограммах присутствуют пики от вторичной стабильной фазы β - Mg_2Si_6 и метастабильных β' - Mg_5Si_6 и β'' - Mg_9Si_5 фаз (рисунок 17). Видно, что в процессе искусственного старения образуются новые вторичные фазы.

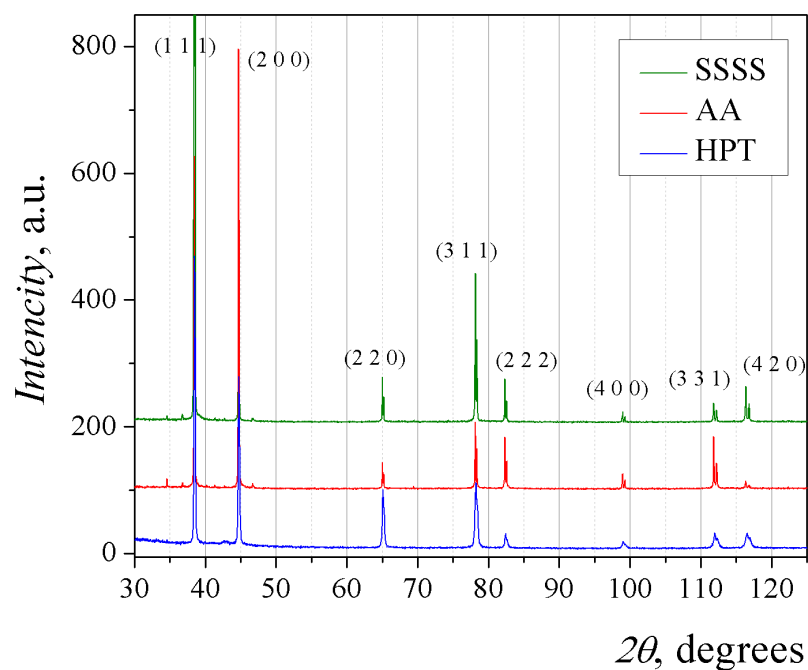


Рисунок 16: Рентгенограммы образцов сплава Al 6101 , обработанных: SSSS - 550 °C 2 h , AA - 550 °C 2h + 160°C 24 h , HPT

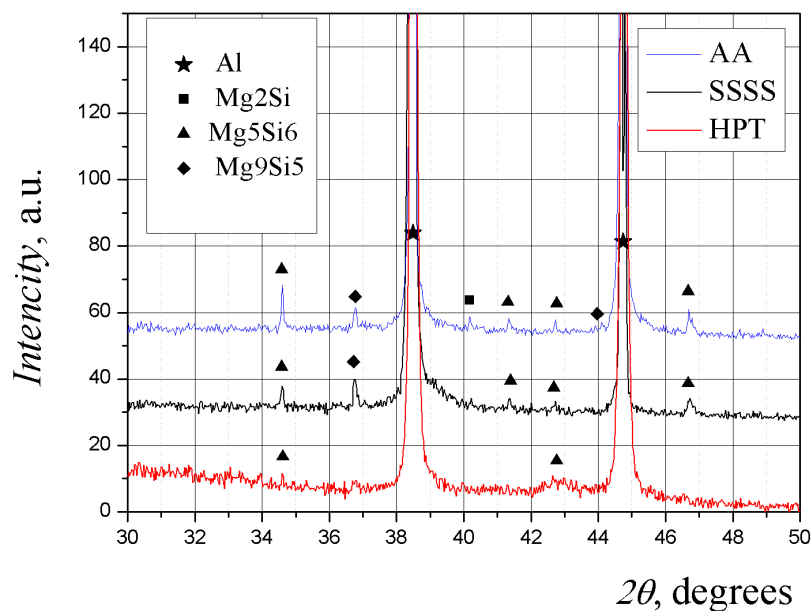


Рисунок 17: Рентгенограмма образцов сплава Al 6101 , обработанных : SSSS - 550 °C 2 h, AA - 550 °C 2h + 160 °C 24 h

3.3. Влияние искусственного старения и интенсивной пластической деформации на электропроводность и микротвердость сплава Al 6101

Электропроводность перенасыщенного твердого раствора сплава Al 6101, полученного в процессе гомогенизации при 550 °С 2 часа, равна $30,09 \pm 0,152$ МСм/м. На рисунке 18 представлена зависимость электропроводности от времени старения при температуре 160 °С. Первые часы старения приводят к уменьшению электропроводности, но последующее увеличение времени старения приводит к монотонному возрастанию электропроводности сплава. В ходе эксперимента наилучшего результата удалось добиться при термообработке в течение суток - $30,9 \pm 0,24$ МСм/м. Но из данных на рисунке 18 можно предположить, что начиная с какого-то момента последующее увеличение времени старения не приведет к значительному повышению электропроводности.

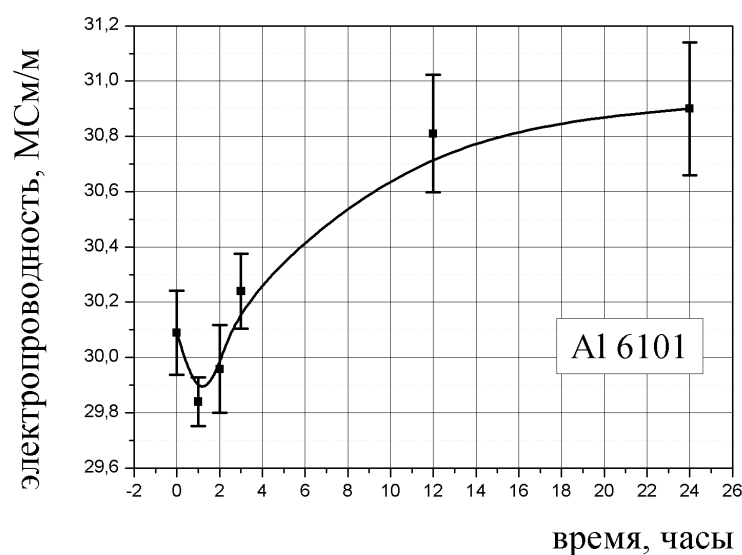


Рисунок 18: Зависимость электропроводности от времени искусственного старения при 160°С образцов Al 6101 с предварительной гомогенизацией при 550 °С 2h

Электропроводность образцов сплава после ИПДК равна $29,6162 \pm 0,5262$ МСм/м. Обработка сплава интенсивной пластической деформацией не позволяет сохранить высокие значения электропроводности,

так как высокая плотность дислокаций УМЗ сплава способствует рассеянию проводящих электронов.

Поведение микротвердости при искусственного старение схоже с поведением электропроводности. При увеличении времени старения значения микротвердости возрастают (рисунок 19). Образовавшиеся вторичные фазы в материале уменьшают скорость распространения дислокаций, материал становится более прочным. Удалось повысить микротвердость образцов в 2,5 раза. Исходная микротвердость сплава $43,97 \pm 0,962$ HV , наилучший показатель был достигнут после старения в течение суток $101,365 \pm 1,4715$ HV.

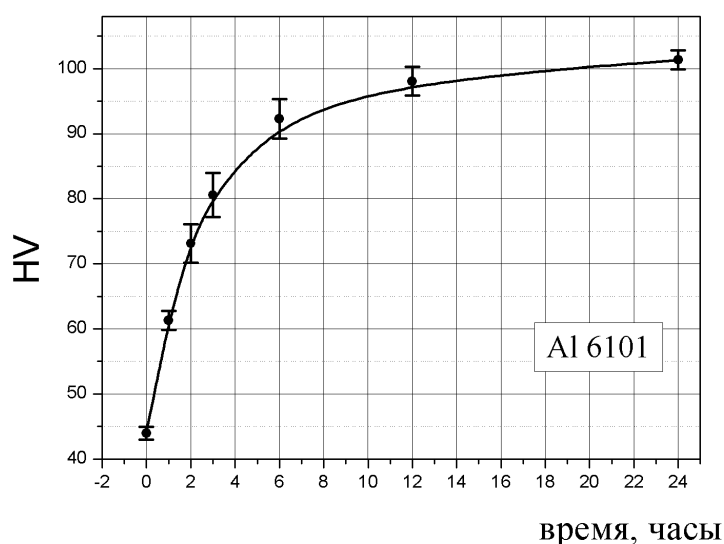


Рисунок 19: Зависимость микротвердости от времени искусственного старения при 160 °C образцов Al 6101 с предварительной гомогенизацией при 550 °C 2h

3.4. Влияние размеров образца на механические свойства сплава Al 6101

Результаты исследования термической обработки на электропроводность и микротвердость образцов позволили выбрать оптимальный режим искусственного старения, при котором достигается наилучшее сочетание этих свойств. На рисунке 20 представлена диаграмма дефор-

мирования сплава Al 6101 искусственно состаренного в течение 24 часов при 160 °С для образцов маленького и большого размеров.

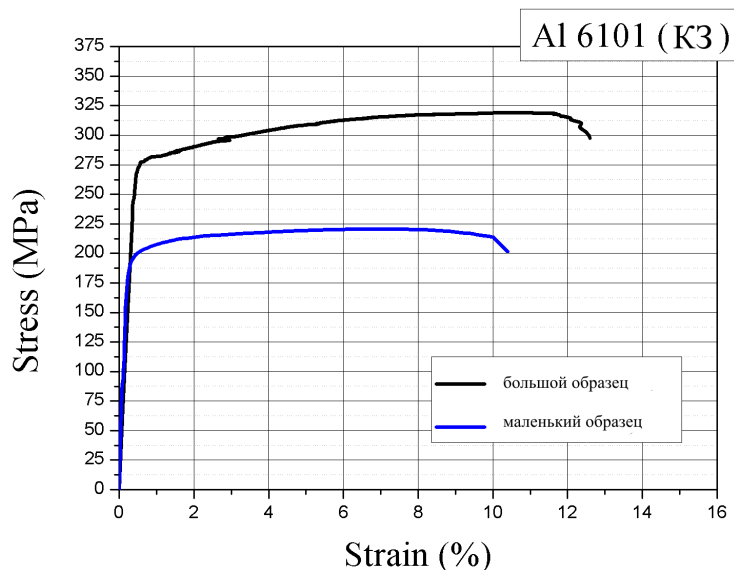


Рисунок 20: Диаграмма $\sigma(\epsilon)$, полученная при деформировании больших и малых образцов КЗ сплава Al 6101.

Механические свойства образцов разной геометрии различны. Уменьшение размера образца приводит к уменьшению предела текучести более чем на 75 МПа. Для малых образцов $\sigma_B = 220$ МПа, что почти в 1,5 раза меньше, чем для больших образцов $\sigma_B = 320$ МПа. Пластичность образцов также понизилась на 2 % с уменьшением их геометрических размеров. Причиной такого поведения является масштабный фактор. Поскольку размер зерен сплава Al 6101 достаточно большой, среднее количество зерен в поперечном сечении существенно понижается с уменьшением размеров образцов. В связи с этим распространение дислокаций в малых образцах происходит намного быстрее, чем в больших, происходит преждевременное разрушение.

3.5. Влияние ИПДК на механические и усталостные свойства сплава Al 6101

Для выбора напряжений циклический испытаний была рассмотрена диаграмма деформирования сплава Al 6101, полученная при использо-

вание малых образцов (рисунок 21). Термическая обработка и ИПДК повышают прочностные характеристики сплава, но при этом пластичность материала снижается почти в 4 раза.

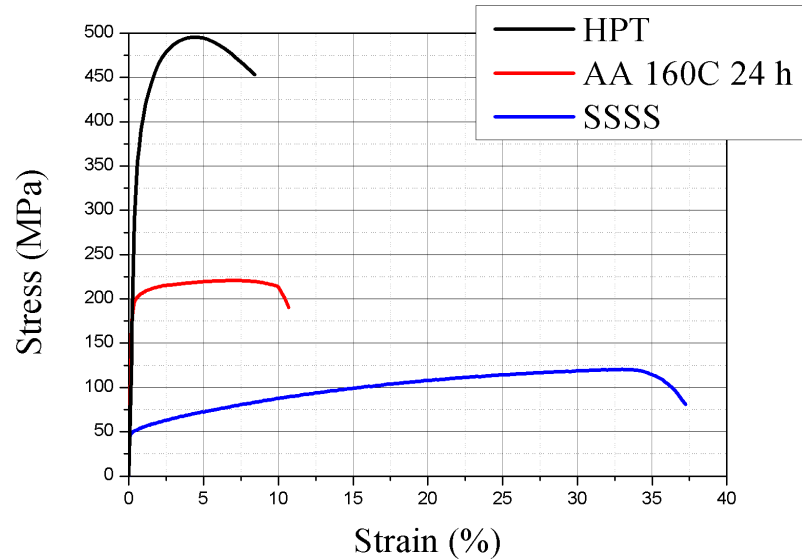


Рисунок 21: Диаграмма $\sigma (\varepsilon)$, полученная при деформировании малых образцов сплава Al 6101, после ИПДК (HPT) , искусственного старения (AA 160 °C 24h) и гомогенизации (SSSS)

Искусственное старение образцов позволило увеличить предел текучести до $\sigma_y = 175$ МПа, а предел прочности на разрыв до $\sigma_B = 220$ МПа. После ИПДК прочность образцов возросла более чем в два раза $\sigma_B = 495$ МПа и предел текучести $\sigma_y = 425$ МПа. Среднее удлинение искусственно состаренных образцов $\varepsilon = 9,216 \pm 2,09$ %, после ИПДК образцы сплава Al 6101 становятся более хрупкими $\varepsilon = 6,708 \pm 1,11$ %.

Для исследования усталостных свойства циклическое нагружение проводилось для УМЗ образцов в диапазоне $425 \div 125$ МПа с шагом 50 МПа, а для КЗ образцов в диапазоне $225 \div 75$ МПа с шагом 25 МПа. На рисунке 22 представлены кривые Вёллера для УКЗ малых образцов, подвергнутых ИПДК, и для искусственно состаренных КЗ образцов большого и малого размеров.

Малоцикловые ветви усталости для состаренных образцов большого и малого размера находятся в хорошем соответствии друг с другом, в то время как в области многоцикловых испытаний видно, что ограни-

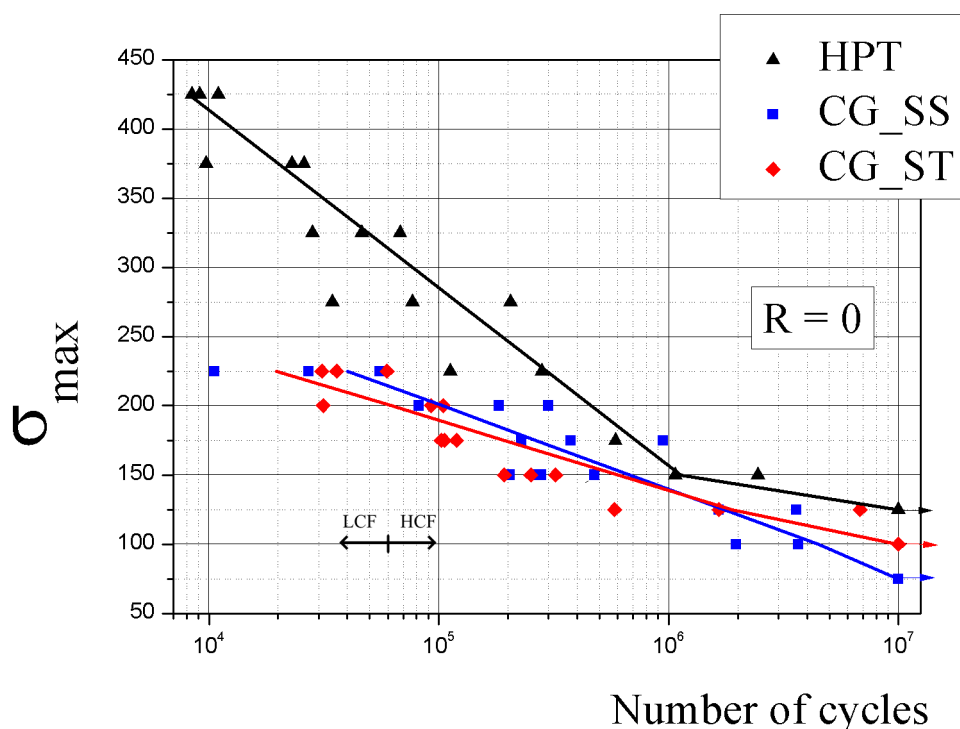


Рисунок 22: Кривые Вёллера для малого образца, подвергнутого ИПДК (НРТ), и для искусственно состаренных образцов большого (CG_ST) и малого (CG_SS) размеров

Ченный предел выносливости уменьшается с 100 МПа до 75 МПа при уменьшение размера образца. Подобное поведение может быть связано с масштабным фактором. Плотность дефектов на поверхности рабочей части увеличивается с уменьшение размеров образца. Еще одной из причин этого явления может быть различие в закономерностях распределения напряжений в образцах большого и малого размера в связи с отсутствием подобия профилей и непропорциональности зависимости толщины образцов от ширины рабочей части. Эти факторы приводят к тому, что вероятность зарождения и распространения трещин увеличивается с уменьшением размеров образца.

В области малоцикловых испытаний видно четкое преимущество ультрамелкозернистых образцов, так как диапазон рабочих напряжений для них значительно шире, чем для состаренных. Предел выносливости таких образцов по сравнению с крупнозернистыми повысился более чем в 1,5 раза и равен 125 МПа.

3.6. Фрактография

Для исследования процесса усталостного разрушения был проведен фрактографический анализ поверхности разрушений УМЗ и КЗ образцов. Образцы были взяты с последнего шага нагружения перед достижением ограниченного предела выносливости. Результаты СЭМ приведены на рисунках 23 и 25. На снимках поверхности усталостного разрушения обоих типов образцов можно выделить 3 зоны: место зарождения трещины, зона стабильного роста и зона долома. Также СЭМ - изображения наглядным образом показывают уменьшение размера зерна в процессе ИПДК.

Видно, что в КЗ образце разрушение по границам зерен происходит хрупко, однако при распространении трещин внутри зерен можно наблюдать характерные усталостные бороздки (рисунок 24 (а)). В зоне долома наблюдается разрушение по смешанному типу, с характерными сферическими ямочками вязкого разрушения и гладкими участками хрупкого разрушения (рисунок 24 (б)). Аналогичное поведение разрушения наблюдается и УМЗ образцах сплава Al 6101 (рисунок 26).

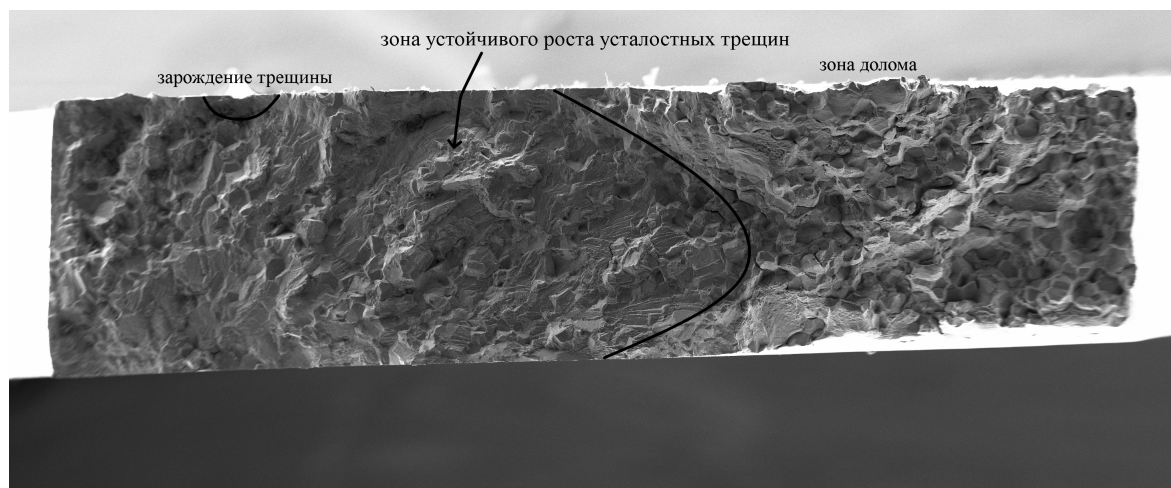


Рисунок 23: Поверхность разрушения КЗ образца Al 6101

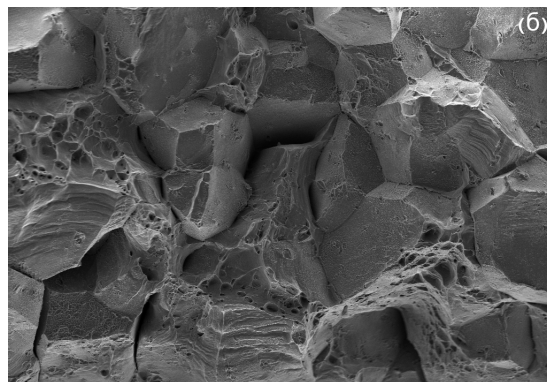
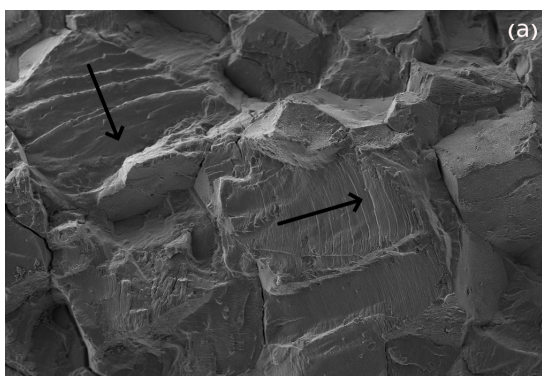


Рисунок 24: Поверхность разрушения КЗ образца сплава Al 6101: (а) Усталостные бороздки; (б) Хрупко-вязкое разрушение

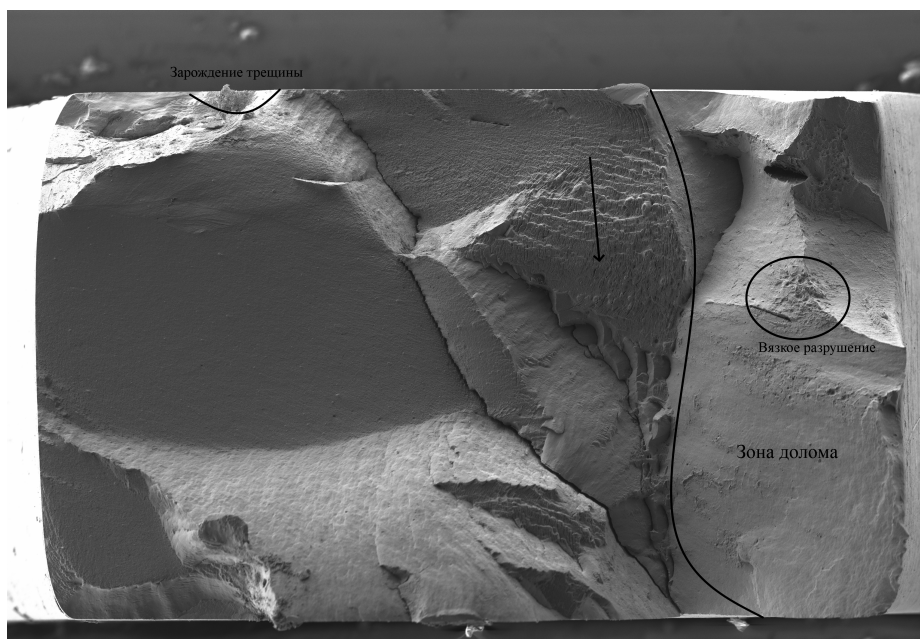


Рисунок 25: Поверхность разрушения УМЗ образца Al 6101

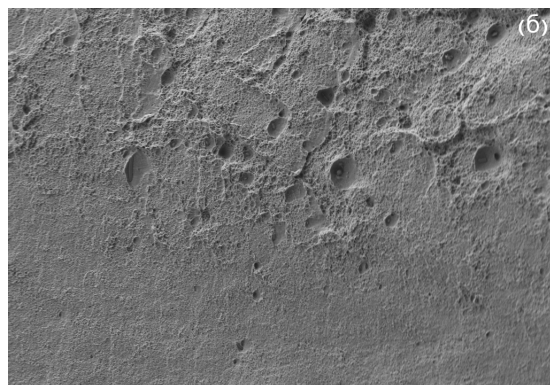
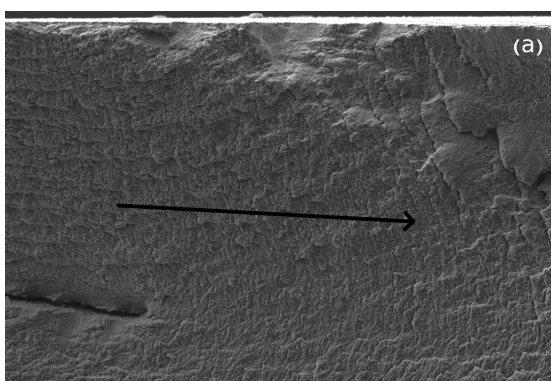


Рисунок 26: Поверхность разрушения УМЗ образца сплава Al 6101: (а) Усталостные бороздки; (б) Зона перехода от вязкого к хрупкому разрушению

Заключение

Все поставленные в исследовании задачи были успешно выполнены, а по полученным результатам работы можно сделать следующие заключения:

1. Результаты исследования влияния времени искусственного старения после гомогенизирующего отжига при 550 °С на электропроводность и микротвердость сплава Al 6101 показали, что увеличение времени старения повышает значения этих свойств, позволяя добиться электропроводности $30,9 \pm 0,24$ МСм/м и $HV = 101,365 \pm 1,4715$ при 160 °С в течение 24 часов.

2. Обработка сплава ИПДК ($P = 2$ ГПа и 5 оборотов) привела к повышению прочности сплава Al 6101, но снизила электропроводность сплава до $29,6162 \pm 0,5262$ МСм/м. Этот результат показывает, что для одновременного повышения электропроводности и прочности сплава одной только обработки ИПДК недостаточно, требуется более детальное изучение влияния последующей термической обработки на электропроводность сплава Al 6101.

3. Построенная кривая Веллера для крупнозернистых (КЗ) и мелкозернистых (УМЗ) образцов показала, что ИПДК повышает предел выносливости более чем в 1,5 раза и диапазон рабочих напряжений в малоцикловой области для УМЗ сравнительно шире, чем для КЗ.

4. Получены экспериментальные зависимости усталостных испытаний от геометрии образцов для сплава Al 6101, полученных с использованием малых образцов и стандартных образцов. Сравнительный анализ полученных данных позволил сформировать представление о правилах масштабирования свойств в зависимости от выбора размера образца. Статистический разброс полученных данных показал хорошую повторяемость результатов.

Список литературы

- [1] J.R. Davis. Aluminum and aluminum alloys. 2001.
- [2] Beata Smyrak and Marek Gnielczyk. Research of chemical composition influence on the mechanical and electrical properties of al-mg-si wires. *Engineering Materials*, 2015.
- [3] Beata Smyrak. Influence of temperature and time of ageing on 6201 grade al-mg-si wire and rod. *Metal*, 2011.
- [4] J.P. Hou and Q. Wang. Microstructure evolution and strengthening mechanisms of cold-drawn commercially pure aluminum wire. *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 2015.
- [5] S.X.DingW, T.Lee, C.P.Chang, L.W.Chang, and P.W.Kao. Improvement of strength of magnesium alloy processed by equal channel angular extrusion. *Scripta Materialia*, 2008.
- [6] Ruslan Z. Valiev, Yuri Estrin, Zenji Horita, Terence G. Langdon, Michael J. Zehetbauer, and Yuntian T. Zhu. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *The Journal of The Minerals, Metals Materials Society*, 2006.
- [7] X. Sauvage, E.V. Bobruk, and M.Yu. Murashkin. Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in al-mg-si alloys. *Acta Materialia*, 2015.
- [8] A. Cardou and L. Cloutier. Fatigue strength characterization of acsr electrical conductors at suspension clamps. *Electric Power Systems Research*, 1990.
- [9] Assessment of the fatigue failure of an all aluminium alloy cable (aaac) for a 230 kv transmission line in the center-west of brazil. *Engineering failure analysis*, 2015.
- [10] A.A. Fadel, D. Rosa, L.B. Murça, J.L.A. Ferreira, and J.A. Araújo. Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an ibis

steel reinforced aluminium conducto. *International Journal of Fatigue*, 2012.

- [11] C.S. Chung, J.K. Kim, H.K. Kim, and W.J. Kim. Improvement of high-cycle fatigue life in a 6061 al alloy produced by equal channel angular pressing. *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 2002.
- [12] I.V. Lomakin, A.R. Arutyunyan, R.R. Valiev, F.A. Gadzhiev, and M.Yu. Murashkin. Design and evaluation of an experimental technique for mechanical and fatigue testing of sub-sized samples. *The Society for Experimental Mechanics*, 2017.